

叶片直冷却通道宽高比对流动换热的数值研究

张艾萍, 毕 帅, 卢 贺

(东北电力大学能源与动力学院, 吉林 132012)

摘 要: 本文运用有限体积法, 采用结构化六面体网格和 $k-\varepsilon$ 湍流模型来求解三维 N-S 方程, 对不同宽高比的内置 V 型扰流肋片的直冷却通道在入口雷诺数为 20 000 时的流动与换热特性进行数值模拟。分析了不同通道宽高比对肋间壁面的流动换热情况, 并对 W/H 进行全局寻优。结果表明, 带肋直通道的整体换热效果和综合冷却效率分别与 W/H 呈近似的函数关系, W/H 为 4.5 时的通道整体换热效果最好, W/H 为 0.35 时的通道综合冷却效率最佳。

关 键 词: 燃气轮机; V 型扰流肋; 宽高比; 全局寻优; 数值模拟

中图分类号: TK472

文献标识码: A

文章编号: 1009-2889(2015)01-0029-06

随着国家节能减排政策对环境要求的提高和能源结构的变化, 燃气发电的比重势必增加, 因此对燃气轮机的发展刻不容缓。燃气轮机的系统循环热效率和输出功率都随燃气的进口温度的增加而增加^[1-2]。提高进口温度需要采用复杂的技术得以保障叶片正常工作, 通常采用改进叶片材料和叶片冷却技术来实现。材料技术难以很快满足需求, 而叶片的冷却技术可以弥补, 冷却通道内置扰流肋作为经典的叶片内部冷却方式也被广泛研究和应用。

国内外很多学者对冷却通道进行了大量的实验研究^[3-10], 但多是针对方形通道。而实际内冷通道受到涡轮叶型的影响, 叶片前缘和后缘内的通道宽高比大小不一, 即冷却通道的截面宽高比并不是一个定值。Han 等人^[11-13]对此做了研究, 研究了宽高比 W/H 为 1/4、1/2、1、2、4 几种情况, 同时也研究了不同宽高比条件下不同 Re 、不同肋片形状和其他不同几何设计参数对通道冷却换热的影响。

国内的丁水汀等人^[14]对不同宽高比截面的燃气轮机涡轮叶片内冷通道的内部流体的流动与换热进行数值模拟, 得出旋转状态下哥氏力和浮升力的交互作用增强了通道后缘的换热, 减弱了前缘的换热。而宽高比影响了二次流漩涡的分布, 随着宽高

比的增大, 二次流漩涡向两侧移动, 削弱了二次流漩涡的输运作用, 使前缘换热有所增强, 后缘有所减弱。史晓军^[15]等人通过实验研究宽高比为 0.25、0.5、1、2、4 情况下通道的传热和摩擦特性, 得出蒸汽在矩形通道中的 Nu_a 和 f_a 均随通道宽高比的增加而增大。

以上研究都是针对离散的通道宽高比设计参数进行实验或者数值模拟, 进而比较得出其中较好的参数, 因此不能保证对设计参数在一定的参数范围内进行全局寻优, 同时对 V 型扰流肋的研究也不多。鉴于此, 本文通过数值模拟对一些离散的 V 型肋片的不同通道宽高比下的传热和压损情况进行数值计算, 并对计算结果利用 MATLAB 进行全局寻优, 得出传热强和流阻小的设计值, 并探讨大宽高比和小宽高比通道内传热和压损特性的差别。

1 计算模型和计算方法

1.1 计算模型

本文运用 UG 参数化建模方法, 对燃气轮机动叶进行简化处理, 采用 Han^[13] 文中的几何模型参数, 建立内部带扰流肋的直通道模型。图 1 是具有对称性的一半冷却通道物理模型参数示意图。图 2

收稿日期: 2014-08-13 改稿日期: 2014-09-01

基金项目: 东北电力大学博士科研启动基金项目(编号: BSJXM-201207)

作者简介: 张艾萍(1968-)男, 内蒙古兴和人, 博士, 教授, 主要从事热备经济性分析及换热设备传热强化及防除垢对策的研究。通讯作者: 毕帅(1989-), 男, 硕士研究生, E-mail: turbine2014@163.com。

为整体通道模型图。

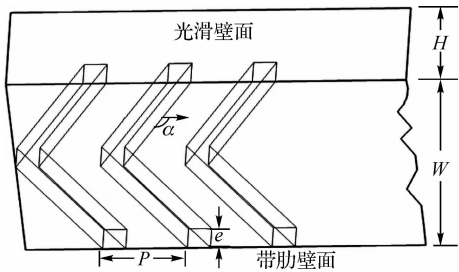


图 1 模型参数示意图

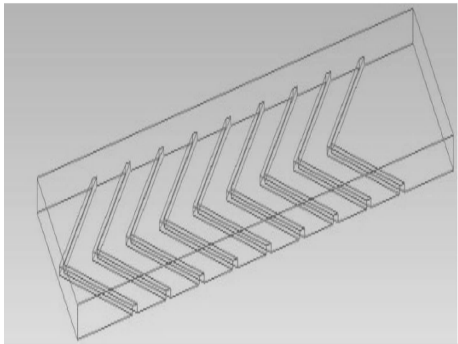


图 2 整体通道模型

计算模型为内置导流角为 45° 的 V 型肋片的矩形通道,冷却通道上下壁面沿流动方向布置 V 型肋片,根据结构的对称性,计算的物理模型取其中一半。其中直通道的长度为 180 mm。肋高 $e = 1.6$ mm,肋高 e 与当量直径 D_h 之比为 0.078:1,肋间距与肋高比 $P/e = 10$,肋宽与肋高之比为 1:1,直通道的高 H 和宽 W 取 9 组,即 9 个算例,其他几何计算参数相同。通道具体宽高参数见表 1。

表 1 计算通道尺寸

通道	W/H	W/mm	H/mm	D_h/mm
I	1/5	10.16	50.80	16.933
II	1/4	12.70	50.80	20.320
III	1/3	16.93	50.80	25.399
IV	1/2	25.40	50.80	33.870
V	1	25.40	25.40	25.400
VI	2	50.80	25.40	33.870
VII	3	50.80	16.93	25.399
VIII	4	50.80	12.70	20.320
IX	5	50.80	10.16	16.933

1.2 网格无关性验证和湍流模型的选取

本文采用了约 50 万、65 万、80 万、95 万、120 万网格进行计算,结果表明在网格数达到 65 万后的各计算结果相差不大。图 3 将 ANSYS 的标准 $k-\varepsilon$ 湍

流模型、 $k-\omega$ 湍流模型和 SST 湍流模型在雷诺数 Re 为 20 000 的模拟结果与 Han 等人^[13] 的实验数据进行比较。由图 3 可见, $k-\omega$ 和 SST 模型的计算结果与实验数据偏差较大,而 $k-\varepsilon$ 湍流模型与实验数据吻合较好,能更准确地模拟带肋通道流动与换热情况,故本文数值计算采用 $k-\varepsilon$ 湍流模型。

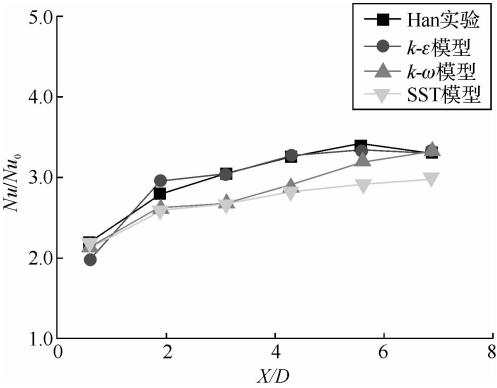


图 3 不同湍流模型的 Nu/Nu_0 和实验数据

1.3 数值计算方法

本文研究的带肋直通道的数值计算采用有限体积法及全隐式方法,用 ANSYS 软件求解三维定常黏性 N-S 方程,计算采用二阶高精度的差分格式,计算收敛的平均残差小于 10^{-5} ,保证计算质量。计算网格用 ICEM 结构化六面体网格形式,主要换热在肋间壁面的 y^+ 值小于 2,重点求解部分采用局部加密。带肋直通道的网格示意图如图 4 所示。

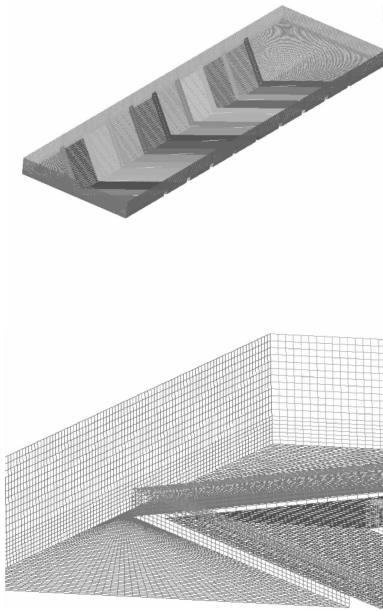


图 4 计算网格

计算模型边界条件采用 Han 等人^[13] 的实验中的参数。进口设置为速度进口,湍流度为 5%,冷却

介质为空气, 给定 $Re = 20\ 000$ 时相对应的法向速度, 出口设置为压力出口, 静压 $0.1\ \text{MPa}$, 计算区域上下带肋壁面为给定热流密度定值 q , 其中顶面设置为直通通道对称面, 左右壁面均为绝热表面。

2 计算结果与分析

采用无量纲的努赛尔数 Nu 来衡量换热的优劣, 冷却通道的平均对流换热系数为

$$h = q / (T_w - T_f) \tag{1}$$

平均努赛尔数为

$$\overline{Nu} = h D_h / \lambda \tag{2}$$

冷却通道的当量直径为

$$D_h = 2HW / (H + W) \tag{3}$$

式中: h 为按光滑通道计算的平均换热系数, q 为冷却通道上下壁面的热流密度, T_w 为冷却通道上下壁面的平均温度, T_f 为冷却通道进口冷却空气的平均温度, λ 为冷却介质的导热系数。

本文引入 $\overline{Nu}$ 与 Nu_0 之比

$$\overline{Nu} / Nu_0 = h (D_h / \lambda) / (0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4}) \tag{4}$$

式中: $\overline{Nu}$ 为实际通道的平均努赛尔数, Nu_0 为与直冷通道具有相同当量直径的光滑圆管通道的平均努赛尔数, Pr 为冷却介质的普朗特数。

2.1 流动与传热特性

对上述 9 种不同类型在相同边界条件下进行数值模拟, 对计算所得的平均努赛尔数 $\overline{Nu}$ 和 W/H 通过 MATLAB 软件拟合得到近似六次函数, 图象如图 5 所示, 然后在该参数范围内进行寻优。其中 $\overline{Nu}$ 是通过后处理软件中的面积加权均值法求得后, 取其平均值。

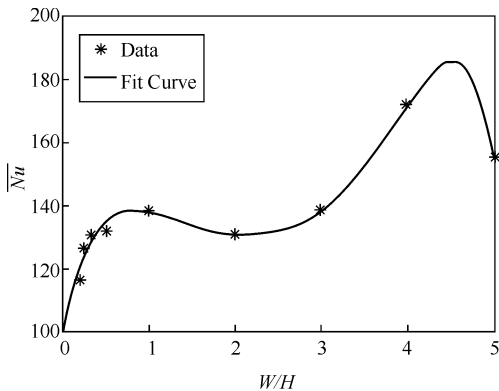


图 5 W/H 与 $\overline{Nu}$ 的拟合曲线

运用粒子群算法在 W/H 为 $1/5 \sim 5$ 的范围内进行寻优, 得到当 $W/H = 4.5$ 时, $\overline{Nu} = 185.00$, 带肋壁面的 Nu 最大, 整体换热效果最好。通过 ANSYS 模拟计算 $W/H = 4.5$ 时得到 $\overline{Nu} = 184.71$, 这样数值模

拟结果与寻优结果误差值较小, 寻优结果可靠度较高。

图 6 是不同宽高比 W/H 的换热系数云图, 图中显示小宽高比通道的换热系数较差, W/H 为 $1/5$ 时通道的整体努赛尔数较小, 随着宽高比的增大, W/H 为 $1/2, 1$ 时通道的肋后的换热效果明显改善。而大宽高比参数的通道的整体换热效果好, 在通道后半程的肋后出现较大面积的高强度换热区域, 而从图中可看出 W/H 为 4.5 时的高强度换热区域略大于其他大宽高比的通道。由此也可很好地印证 $W/H = 4.5$ 时的整体换热效果最好。

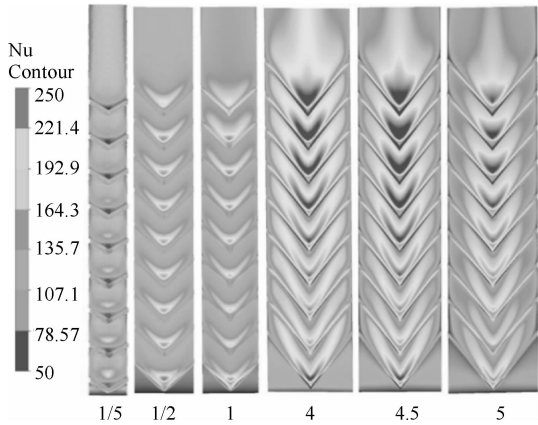


图 6 不同 W/H 的带肋壁面的 Nu 云图

图 7 是不同 W/H 的带肋壁面的平均努赛尔数比, 从图中可看出平均努赛尔数之比随 W/H 大体呈先增大后减小的趋势, 通道宽高比 W/H 在 4.5 时的换热效果最好。

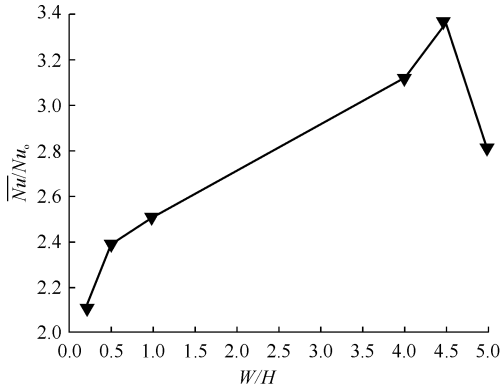


图 7 不同 W/H 带肋壁面的 $\overline{Nu} / Nu_0$

图 8 给出了不同宽高比通道中, 沿流动方向相同位置处 $y-z$ 截面的流线图。小宽高比通道中的通道带肋壁面占通道四壁面的面积较小, 通道高度相对宽度大, 由扰流肋引起的气流漩涡不足以覆盖整个截面, 从而不能加强换热。随宽高比的增加, 带肋壁面增大, 其占总内壁面的比例增大, 漩涡作用效

果增强,使得流体分离、再附,加强了对边界层和通道内主流的扰动,达到破坏、削薄边界层从而减小热阻和形成二次流加强换热的作用。由图中可看出 W/H 为 1/5 的通道漩涡不足以覆盖整个通道空间,而 W/H 为 1 时漩涡基本填充整个通道空间,换热效果已经明显改善,但是整体速度偏小,对壁面冲刷弱,其换热效果还是低于大宽高比的通道换热。在 W/H 为 4、4.5、5 时通道的换热情况相近,图 8 中可看出其漩涡基本足够填充通道空间,而通道中间也即 V 型肋片尖端附近处的气流存在差别, W/H 为 4.5 时的气流速度偏大,即合适的通道宽高比能够满足漩涡的充分发展,从而增强换热效果。

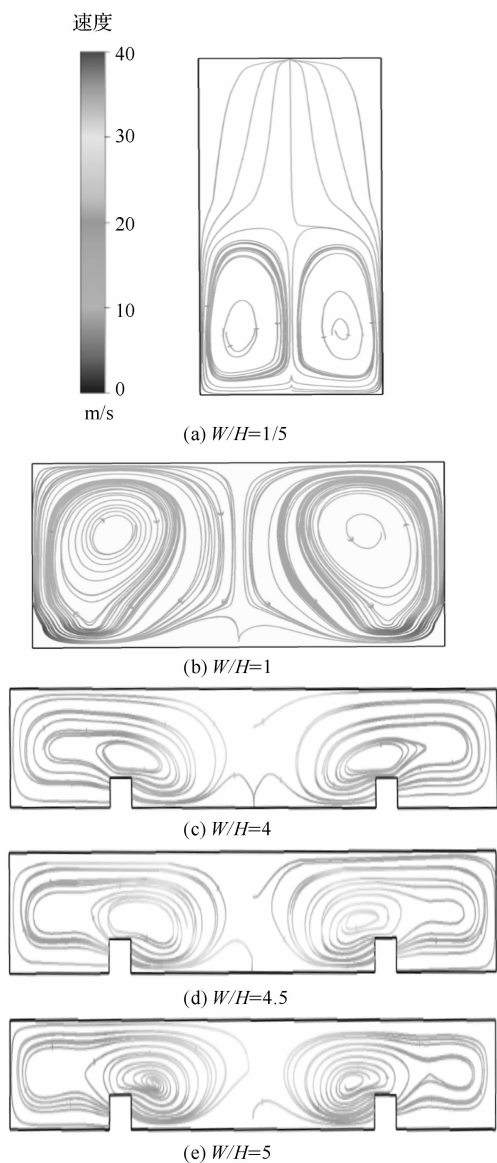


图 8 不同宽高比通道沿流动方向相同位置处 $y-z$ 截面的流线图

2.2 流阻特性

在追求换热效果的同时,通道的压力损失也不容忽视。

通道平均阻力系数:

$$f = 2(P_{in} - P_{out})D_h / L\rho U^2 \quad (5)$$

式中: L 为冷却通道长度, ρ 为冷却介质密度, P_{in} 为周期性计算区域的入口压力, P_{out} 为周期性计算区域的出口压力, D_h 为冷却通道当量直径, U 为冷却介质入口平均速度。

f 与相同 Re 数下具有相同当量直径的光滑圆管通道的平均阻力系数之比为:

$$f/f_0 = f/0.079Re^{-0.25} \quad (6)$$

式中: f 为带肋直冷却通道的平均压力损失系数, f_0 为带肋直冷却通道具有相同当量直径的光滑圆管通道的平均压力损失系数。

图 9 为不同的通道宽高比下的通道的平均阻力之比。由图 9 可看出 f/f_0 与 W/H 大体呈增大趋势。当宽高比 W/H 从 1/5 增大到 5 的过程中,带肋壁面占四内壁面的总面积的比例增大,对气流的摩擦增大。在达到 4 之后, W/H 为 5 的流动阻力减小,这是由于当宽高比比例增大到一定程度时,相对较低的通道高度的通道空间影响产生的漩涡,从而使阻力略有减弱。

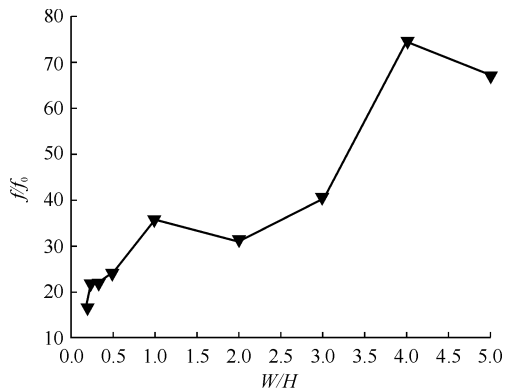


图 9 f/f_0 与 W/H 的关系

2.3 综合冷却效果分析

本文引入综合冷却效率 N 来综合考虑带肋冷却通道的流动损失和换热效果。综合冷却效率

$$N = (\overline{Nu}/Nu_0)/(f/f_0)^{1/3} \quad (7)$$

本文将综合冷却效率 N 和通道宽高比 W/H 代入 MATLAB 进行拟合,得到近似六次函数,如图 10。由图可见,在相同的边界条件下,在本文优化参数 1/5 ~ 5 的取值范围内, N 随着通道的 W/H 增大而先增大后呈现波动,大宽高比的通道的整体综合冷

却效率有所增大但是仍呈减小趋势。图中 $W/H = 0.35$ 时的通道综合冷却效率最高, $N = 0.845$ 。因此,通道在宽高比大于1后有增大趋势,但是整体呈现先增后减趋势,虽有所增幅,但大宽高比下综合冷却效率普遍低于小宽高比下的综合冷却效率。

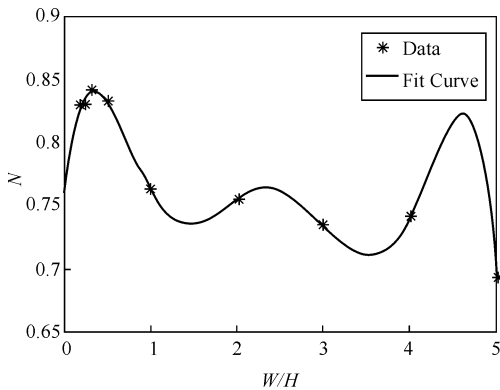


图10 W/H 与通道综合冷却效率的关系

3 结论

本文针对内部带有V型扰流肋的直通道的流动与传热特性进行数值模拟,然后对影响流动与传热效果的冷却通道的宽高比这一设计参数运用MATLAB进行全局寻优,得出如下结论:

(1) 当雷诺数为20 000时,通道的整体换热能力和综合冷却效率均随通道的宽高比大体呈先增大后减小的趋势,两者都与通道宽高比这一几何参数呈现近似的函数关系。合理选择通道的位置布置可以提高通道的整体换热和综合冷却效率。

(2) 小宽高比通道中的漩涡占整体通道的空间小,不足以覆盖整个截面,而大宽高比通道的漩涡足够影响整个通道空间,同时带肋壁面宽度增大,在增强换热的同时也增大了流动损失。

(3) 以通道宽高比为优化目标,取值范围为 $1/5 \leq W/H \leq 5$,当 W/H 为4.5时具有最好的整体传热性能, W/H 为0.35时的综合冷却效率最大。

参考文献:

- [1] 韩介勤,桑地普·杜达,斯瑞纳斯·艾卡德. 燃气轮机传热和冷却技术[M]. 程代京,谢永惠,译. 西安:西安交通大学出版社,2005.
- [2] 曹玉璋,陶智,徐国强,等. 航空发动机传热学[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2005.
- [3] Han J C, Zhang Y M, Lee C P. Augmented heat transfer in square channels with parallel, crossed, and V-Shaped angled Ribs[J]. ASME Journal of Heat Transfer, 1991, 113: 590-596.
- [4] Han J C, Huang J J, Lee C P. Augmented heat transfer in square channels with Wedge-Shaped and Delta-Shaped turbulence promoters[J]. Enhanced Heat Transfer, 1993, 1(1): 37-52.
- [5] Stephens M A, Shih T I P, Civinskas K C. Effects of inclined rounded RIBS on flow and heat transfer in a square duct[C]. 30th AIAA Thermophysics Conference, 1995: 2115-2126.
- [6] Rallabandi A P, Yang H, Han J C. Heat transfer and pressure drop correlations for square channels with 45deg ribs at Reynolds numbers[J]. ASME Journal of Heat Transfer, 2009, 131: 071703.
- [7] 倪萌,朱惠人,裴云,等. 肋角度对流量系数影响的数值模拟研究[J]. 航空动力学报, 2004, 19(2): 196-200.
- [8] 韩绪军. 涡轮叶片冷却结构参数化及带肋通道优化设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2011: 1-94.
- [9] LIU Jia-zeng, GAO Jian-min, GAO Tie-yu. Forced convection heat transfer of stream in a square ribbed channel[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2012, 26(4): 1291-1298.
- [10] 迟重然,任静,蒋洪德. 燃气轮机叶片平行肋扰流内冷通道传热特性研究 Part I: 流动传热机理[J]. 工程热物理学报, 2013, 34(4): 624-627.
- [11] Han J C, Park J S, Ibrahim Y M. Measurement of heat transfer and pressure and pressure drop in rectangular channels with turbulence promoters[R]. NASA Report 4015, 1986: 0-198.
- [12] Park J S, Han J C, Huang Y, et al. Heat transfer performance comparisons of five different rectangular channels with parallel angled Ribs[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1992, 35(11): 2891-2903.
- [13] Wright L M, Fu W L, Han J C. Thermal performance of Angled, V-Shaped, and W-Shaped rib turbulators in rotating rectangular cooling Channels (AR=4:1)[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2004, 126: 604-614.
- [14] 丁水汀,王彬,刘传凯,等. 不同宽高比旋转方形通道内部流体流动与换热的数值研究[J]. 热科学与技术, 2007, 6(4): 304-308.
- [15] 史晓军,税琳棋,高建民,等. 蒸汽冷却带肋矩形通道传热和降压实验关联式[J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(11): y1-y6.

Numerical Simulation on Flow and Heat Transfer about Aspect Ratioin Cooling Rectangular Channel of Blade

ZHANG Ai-ping, BI Shuai, LU He

(School of Energy and Power Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China)

Abstract: A finite volume method with hexahedral structured meshes and k-ε turbulence model was used to solve the three dimensions compressible Navier-Stokes equations in the paper. Numerical simulation was conducted to investigate flow and heat transfer properties in rectangular channel of different aspect ratios with v-shaped disturbed flow rib at inlet Reynolds number of 20 000. Analyzing the different passage aspect ratio W/H that affects the heat transfer and flow loss at the wall between the ribs. Then, conduct global optimization to W/H. The numerical result shows that the overall effect of heat transfer and integrated cooling efficiency of straight cooling channels with ribs both are approximated functions with W/H. The overall effect of heat transfer of the channel with the aspect ratio is 4.5 that is best, the channel integrated cooling efficiency is optimal when the aspect ratio is 5.2.

Key words: gas-turbine; v-shaped disturbed flow rib; aspect ratio; overall optimization; numerical simulation

(上接第 23 页)

Heavy-Duty Gas Turbine Modelling and Simulation basing on Simscape

XU Meng-meng¹, ZHU Yu-hao¹, FENG Rui², LIU Yong-wen¹

- (1. Gas Turbine Research Institute, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;
- 2. Shanghai Siemens Gas Turbine Parts Co. Ltd, Shanghai 200240, China)

Abstract: The amount of secondary air of modern heavy-duty gas turbine accounts for about 20% of total compressor flow, which has a significant influence on gas turbine. For fully using secondary air, Siemens installs control valve in part of secondary air loops to control flow, which is applied on SGT5-4000F and other gas turbine types. For the study of secondary air cooling control system, a common extensible gas turbine library and a heavy duty gas turbine model are built. A varying duty simulation experiment shows that secondary air cooling control system can optimize gas turbine overall performance by protecting turbine and improving compressor efficiency.

Key words: heavy-duty gas turbine; modelling; secondary air; Simscape

(上接第 28 页)

Performance Analysis of A Small Turbine with Different Shroud Seal

SHI Shu-cheng, DONG Xue-zhi, LIU Xi-yang, GAO Qing, CHEN Hai-sheng, TAN Chun-qing

- (1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
- 2. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Based on a numerical simulation of the tip leakage of a small turbine, this paper analyses the flow characteristics in tip clearance under different shape and height of the shroud seal. The results show that the tip leakage flow mainly exists in the middle and rear area of the blade. While keeping the tip clearance unchanged, small turbine with trapezoidal shroud seal performs the best efficiency. The efficiency of the small turbine can also be improved by reducing the height of the shroud seal.

Key words: tip clearance; shroud seal; small turbine